

SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL NA INDÚSTRIA 4.0: APLICAÇÕES, BENEFÍCIOS E DESAFIOS, UMA REVISÃO INTEGRATIVA DA LITERATURA

**INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0: APPLICATIONS,
BENEFITS AND CHALLENGES, AN INTEGRATIVE LITERATURE REVIEW**

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 24/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/784646590](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/784646590)

Antônio da Conceição Meneses Júnior¹

Fabíola dos Santos²

RESUMO

Este artigo analisa as aplicações, os benefícios e os desafios dos sistemas de automação industrial no contexto da Indústria 4.0. A pesquisa parte da constatação de que a produção científica sobre o tema cresceu de forma acelerada, porém fragmentada em estudos dedicados a tecnologias isoladas, sem uma síntese que reúna o conjunto dos sistemas de automação, seus resultados e suas limitações. Para preencher essa lacuna, realizou-se uma revisão integrativa da literatura publicada entre 2021 e 2026, com buscas nas bases Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library e MDPI, da qual resultou um corpus final de dezessete estudos revisados por pares. Os resultados indicam que sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas Industrial, gêmeos digitais e robótica colaborativa formam o núcleo tecnológico da automação na Indústria 4.0, com aplicações consolidadas em manutenção preditiva, montagem colaborativa e integração de dados de produção. Os benefícios documentados abrangem ganhos de produtividade, redução de paradas não planejadas, melhoria da qualidade e fortalecimento da competitividade. Os desafios concentram-se no custo de investimento, na integração com sistemas legados, na cibersegurança e na escassez de competências digitais, com desvantagem acentuada para as pequenas e médias empresas. Conclui-se que a hipótese formulada foi confirmada e que a adoção plena desses sistemas depende de estratégias que articulem tecnologia, gestão e qualificação profissional.

Palavras-chave: Automação industrial; Indústria 4.0; Sistemas ciberfísicos; Manufatura inteligente; Revisão integrativa.

ABSTRACT

This article analyzes the applications, benefits, and challenges of industrial automation systems within the context of Industry 4.0. The

research stems from the observation that scientific production on the subject has grown rapidly but remains fragmented into studies devoted to isolated technologies, lacking a synthesis that gathers the full set of automation systems, their outcomes, and their limitations. To fill this gap, an integrative literature review was conducted covering publications from 2021 to 2026, with searches in the Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, and MDPI databases, resulting in a final corpus of seventeen peer-reviewed studies. The results indicate that cyber-physical systems, the Industrial Internet of Things, digital twins, and collaborative robotics form the technological core of automation in Industry 4.0, with consolidated applications in predictive maintenance, collaborative assembly, and production data integration. The documented benefits include productivity gains, reduction of unplanned downtime, quality improvement, and strengthened competitiveness. The challenges concentrate on investment costs, integration with legacy systems, cybersecurity, and the shortage of digital skills, with a marked disadvantage for small and medium-sized enterprises. The study concludes that the formulated hypothesis was confirmed and that the full adoption of these systems depends on strategies that articulate technology, management, and professional qualification.

Keywords: Industrial automation; Industry 4.0; Cyber-physical systems; Smart manufacturing; Integrative review.

1. INTRODUÇÃO

A produção industrial passou por sucessivas transformações desde a mecanização movida a vapor até a eletrificação das linhas de montagem e, posteriormente, a automação baseada em eletrônica e computação. A quarta dessas transformações, denominada

Indústria 4.0, distingue-se das anteriores pela integração entre o ambiente físico da fábrica e o ambiente digital de dados, algoritmos e redes (Schwab, 2016). Nesse novo arranjo produtivo, máquinas, sensores, controladores e sistemas de gestão trocam informações em tempo real e sustentam decisões cada vez mais descentralizadas e automatizadas (Radanliev *et al.*, 2022). A expressão, cunhada na Alemanha na década passada, deixou de designar apenas uma agenda de política industrial e passou a nomear um campo consolidado de pesquisa científica e de aplicação empresarial.

Os sistemas de automação industrial ocupam posição central nessa transição. Controladores lógicos programáveis, sistemas supervisórios, redes industriais, robôs colaborativos e plataformas de Internet das Coisas Industrial constituem a infraestrutura que conecta o chão de fábrica às camadas superiores de análise e gestão. A literatura recente indica que a combinação dessas tecnologias com inteligência artificial, computação em nuvem e gêmeos digitais amplia a capacidade de monitoramento, previsão e otimização dos processos produtivos (Rathore *et al.*, 2021; Othman; Yang, 2023). Ao mesmo tempo, estudos sobre adoção tecnológica revelam que parcela expressiva das organizações, sobretudo as pequenas e médias empresas, encontra obstáculos financeiros, técnicos e organizacionais que retardam ou inviabilizam essa modernização (Ghobakhloo *et al.*, 2022).

Esse contraste entre o potencial descrito pela literatura e as dificuldades observadas na prática configura o problema que orienta esta pesquisa: quais são as aplicações, os benefícios e os desafios dos sistemas de automação industrial no contexto da Indústria 4.0, segundo a produção científica recente? A pergunta se justifica por duas razões complementares. Do ponto de vista teórico, a produção

acadêmica sobre o tema cresceu de forma acelerada, porém fragmentada. Há revisões dedicadas a tecnologias específicas, como gêmeos digitais (Semeraro *et al.*, 2021), robótica colaborativa (Keshvarparast *et al.*, 2024) e aprendizado de máquina aplicado à colaboração humano-robô (Semeraro; Griffiths; Cangelosi, 2023), mas observa-se a ausência de uma síntese integrativa que reúna e analise, de forma sistematizada, o conjunto dos sistemas de automação, seus resultados e suas limitações. Do ponto de vista prático, gestores industriais e formuladores de políticas de desenvolvimento produtivo carecem de um panorama consolidado que apoie decisões de investimento e de qualificação de pessoas.

Diante disso, o objetivo geral deste estudo é analisar, por meio de uma revisão integrativa da literatura, as aplicações, os benefícios e os desafios dos sistemas de automação industrial no contexto da Indústria 4.0. De modo específico, pretende-se: (i.) identificar os principais sistemas de automação industrial aplicados à Indústria 4.0 descritos na literatura científica; (ii) analisar os benefícios da adoção desses sistemas para a produtividade, a eficiência operacional e a competitividade das organizações; e (iii) identificar os principais desafios e perspectivas relacionados à sua implementação. Parte-se da hipótese de que os sistemas de automação desempenham papel relevante na concretização da Indústria 4.0, com ganhos documentados de produtividade e eficiência, embora sua adoção permaneça limitada por barreiras técnicas, econômicas e organizacionais.

A revisão integrativa mostra-se adequada a esse propósito porque permite combinar estudos de naturezas metodológicas distintas, teóricos e empíricos, quantitativos e qualitativos, em uma síntese analítica única. Ao reunir evidências dispersas em bases

internacionais e organizá-las em eixos temáticos, o trabalho preenche a lacuna identificada e oferece um quadro de referência útil tanto para a agenda de pesquisa em engenharia de automação e gestão industrial quanto para a tomada de decisão nas organizações que enfrentam, na prática, o desafio de modernizar seus sistemas produtivos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção reúne os fundamentos conceituais que sustentam a revisão. O percurso parte da trajetória histórica da automação industrial, avança pelas tecnologias que a redefinem no paradigma da Indústria 4.0 e se encerra no debate contemporâneo sobre adoção, benefícios e barreiras, que prepara a análise desenvolvida nas seções seguintes.

2.1. Da Automação Clássica à Indústria 4.0

A automação industrial antecede em muito a Indústria 4.0. Desde a terceira revolução industrial, controladores lógicos programáveis executam a lógica de controle de máquinas e processos (Moraes; Castrucci, 2007), enquanto sistemas supervisórios concentram o monitoramento e a operação de plantas inteiras, com trajetória consolidada em setores como energia, saneamento, petróleo e gás (Groover, 2011; Lamb, 2015). Essa arquitetura tradicional organizava-se de forma hierárquica e piramidal: sensores e atuadores na base, controladores no nível intermediário e sistemas de supervisão e gestão no topo, com fluxos de informação predominantemente verticais e pouco integrados. A própria busca por eficiência e por eliminação de desperdícios nos sistemas produtivos antecede a

digitalização, como demonstra a consolidação do sistema Toyota de produção (Shingo, 1996).

A Indústria 4.0 altera essa lógica. Em vez de camadas estanques, o paradigma propõe a integração horizontal e vertical dos sistemas produtivos, na qual equipamentos, produtos e pessoas se comunicam continuamente por meio de redes digitais, movimento que a literatura brasileira de engenharia de produção sistematizou ao organizar os conceitos e fundamentos da Indústria 4.0 (Sacomano; Gonçalves; Bonilla, 2018). Radanliev *et al.* (2022) descrevem essa convergência a partir da articulação entre sistemas ciberfísicos, Internet das Coisas e inteligência artificial, que juntos permitem representar, analisar e controlar processos físicos a partir de suas contrapartes digitais. Jefroy, Azarian e Yu (2022) acrescentam que o próprio paradigma segue em evolução, com a emergência do debate sobre a Indústria 5.0, orientado à centralidade humana, à resiliência e à sustentabilidade, o que reforça o caráter dinâmico do campo e a necessidade de sínteses periódicas da literatura.

Nesse contexto, o conceito de sistema de automação industrial se expande. Ele deixa de se restringir ao controle local de máquinas e passa a abranger o conjunto de tecnologias que conectam o processo físico à camada de dados: controladores de nova geração com conectividade nativa, supervisórios com arquitetura aberta, redes industriais determinísticas, dispositivos de borda e plataformas de análise. É esse conjunto ampliado que a presente revisão toma como objeto.

2.2. Tecnologias Habilitadoras da Automação na Indústria 4.0

A automação na Indústria 4.0 não decorre de uma tecnologia única, mas da convergência de um conjunto de sistemas que se complementam. Os subtópicos a seguir examinam os quatro pilares desse arranjo, na ordem em que se encadeiam na arquitetura produtiva: a infraestrutura ciberfísica de conectividade, os gêmeos digitais, a robótica colaborativa e a camada de supervisão e integração de dados.

2.2.1. Sistemas Ciberfísicos e Internet das Coisas Industrial

Os sistemas ciberfísicos (CPS, na sigla em inglês) constituem o núcleo conceitual da Indústria 4.0. Trata-se de sistemas nos quais processos físicos e computacionais operam de forma acoplada: o que ocorre na planta altera os modelos digitais, e as decisões tomadas no ambiente digital retornam ao processo físico na forma de comandos de controle. A Internet das Coisas Industrial (IIoT) fornece a camada de conectividade dessa arquitetura, ao instrumentar equipamentos com sensores de baixo custo e transmitir dados operacionais em grande volume e alta frequência (Radanliev *et al.*, 2022). A combinação entre CPS e IIoT viabiliza aplicações como o monitoramento remoto de ativos, a rastreabilidade completa da produção e a manutenção baseada em condição, que substituem rotinas reativas por estratégias preditivas (Hector; Panjanathan, 2024).

2.2.2. Gêmeos Digitais

O gêmeo digital é a réplica virtual de um ativo, processo ou sistema, sincronizada com sua contraparte física por meio de dados coletados em tempo real. Semeraro *et al.* (2021), em revisão sistemática dedicada ao tema, demonstram que o conceito

amadureceu de uma ideia de simulação avançada para um paradigma de integração entre modelagem, sensoriamento e análise, com aplicações em projeto, operação e manutenção. Lattanzi *et al.* (2021) examinam as condições para a implementação prática dessa tecnologia na manufatura e apontam que a fidelidade dos modelos, a qualidade dos dados e a integração com os sistemas legados de automação determinam o sucesso das iniciativas. Rathore *et al.* (2021) evidenciam, por sua vez, que inteligência artificial, aprendizado de máquina e big data são componentes cada vez mais incorporados aos gêmeos digitais, o que os transforma em instrumentos de predição e otimização, e não somente de visualização. Há ainda uma vertente que explora o gêmeo digital como recurso de segurança, ao permitir testar cenários de ataque e validar defesas sem expor o processo físico real (Lampropoulos; Siakas, 2023).

2.2.3. Robótica Industrial e Colaborativa

A robótica acompanha a automação industrial desde a década de 1960, mas a Indústria 4.0 introduz uma inflexão relevante: os robôs colaborativos, projetados para operar no mesmo espaço físico que trabalhadores humanos, sem as barreiras de segurança que isolavam os robôs convencionais. Othman e Yang (2023) revisam o estado da arte da colaboração humano-robô na manufatura inteligente e identificam quatro tecnologias estruturantes dessas aplicações: inteligência artificial, robôs colaborativos, realidade aumentada e gêmeos digitais, com casos consolidados nos setores automotivo e alimentício. Keshvarparast *et al.* (2024) sistematizam a literatura sobre robôs colaborativos em sistemas de manufatura e montagem e mostram que as pesquisas evoluíram de questões de segurança física para problemas de alocação de tarefas,

balanceamento de linhas e produtividade conjunta entre humanos e máquinas.

Evidências empíricas corroboram os ganhos operacionais dessa integração. Calvo e Gil (2022) avaliam a inserção de robôs colaborativos em células de montagem e documentam reduções mensuráveis de tempo de processo, com retorno econômico compatível com a escala de empresas de menor porte. Em direção complementar, Semeraro, Griffiths e Cangelosi (2023) revisam o uso de aprendizado de máquina na colaboração humano-robô e verificam que técnicas de reconhecimento de intenção e de adaptação de trajetória tornam essa cooperação mais fluida e segura, enquanto Mukherjee *et al.* (2022) mapeiam as estratégias de aprendizagem que permitem aos robôs adquirir novas habilidades em ambientes industriais dinâmicos. A esse movimento soma-se a agenda de pesquisa sobre ambientes de trabalho centrados no humano, na qual a interação humano-robô é examinada também sob os critérios de bem-estar, ergonomia e desempenho conjunto (Panagou; Neumann; Fruggiero, 2024).

2.2.4. Supervisão, Controle e Integração de Dados

Os sistemas supervisórios e os controladores lógicos programáveis permanecem indispensáveis, mas passam por reconfiguração profunda. Na arquitetura da Indústria 4.0, a camada de supervisão deixa de ser uma ferramenta fechada de monitoramento e assume o papel de plataforma de integração entre a tecnologia de operação e a tecnologia da informação, com suporte a múltiplos protocolos e conexão com serviços em nuvem. Os controladores de nova geração incorporam conectividade Ethernet industrial, capacidade de processamento local e funções de diagnóstico que alimentam

diretamente as aplicações analíticas descritas nos itens anteriores, como os gêmeos digitais e os modelos de manutenção preditiva (Rathore *et al.*, 2021; Hector; Panjanathan, 2024). Essa convergência dissolve gradualmente a pirâmide clássica da automação e aproxima o dado do ponto de decisão, seja ele humano ou algorítmico.

2.3. Adoção, Benefícios Esperados e Barreiras: O Estado do Debate

A literatura converge quanto aos benefícios potenciais dos sistemas de automação na Indústria 4.0: aumento de produtividade, redução de paradas não planejadas, melhoria da qualidade, flexibilidade para lotes menores e customizados e ganho de competitividade em cadeias globais (Othman; Yang, 2023; Keshvarparast *et al.*, 2024), em consonância com os objetivos de desempenho clássicos da gestão de operações, como custo, qualidade, velocidade, confiabilidade e flexibilidade (Slack; Brandon-Jones; Johnston, 2018). A convergência é menor, porém, quando o tema é a efetiva adoção dessas tecnologias. Ghobakhloo *et al.* (2022), em revisão sistemática apoiada no modelo tecnologia-organização-ambiente, demonstram que pequenas e médias empresas permanecem em desvantagem significativa na transformação digital e identificam determinantes tecnológicos, organizacionais e ambientais que operam ora como impulsores, ora como barreiras: custo de investimento, incompatibilidade com a infraestrutura legada, riscos de cibersegurança, escassez de competências digitais e ausência de roteiros claros de implementação.

Esse quadro sugere que o debate científico sobre automação industrial na Indústria 4.0 se organiza em torno de uma tensão

central. De um lado, um corpo crescente de evidências técnicas documenta aplicações maduras e ganhos operacionais mensuráveis. De outro, os estudos de adoção revelam que tais ganhos se distribuem de forma desigual entre setores, portes de empresa e regiões, em função de barreiras que não são apenas tecnológicas, mas também econômicas e organizacionais. A presente revisão integrativa se situa exatamente nesse ponto de intersecção: reunir as duas vertentes, a das aplicações e benefícios e a dos desafios de implementação, em uma síntese única, capaz de responder aos objetivos propostos e de subsidiar tanto a pesquisa quanto a prática gerencial.

3. METODOLOGIA

A pesquisa classifica-se como revisão integrativa da literatura, de abordagem qualitativa e finalidade descritivo-analítica (Whittemore; Knafl, 2005; Souza; Silva; Carvalho, 2010). Esse método foi escolhido por admitir a combinação de estudos com desenhos metodológicos distintos, revisões sistemáticas, surveys, estudos de caso e trabalhos teóricos, em uma síntese única, o que se ajusta ao objeto investigado, cuja produção científica é heterogênea e distribuída entre a engenharia, a computação e a gestão. Botelho, Cunha e Macedo (2011) ressaltam a pertinência do método também nos estudos organizacionais, campo com o qual a gestão industrial dialoga de forma direta. A condução do trabalho observou, ainda, os fundamentos clássicos da metodologia científica quanto à formulação do problema, à delimitação do escopo e ao rigor na documentação do percurso (Gil, 2002; Severino, 2002; Lakatos; Marconi, 2007).

O percurso metodológico seguiu seis etapas, em consonância com os desenhos descritos na literatura do método (Souza; Silva; Carvalho, 2010; Botelho; Cunha; Macedo, 2011): definição da questão de pesquisa; estabelecimento dos critérios de inclusão e exclusão; busca e seleção dos estudos; extração e tabulação dos dados; avaliação crítica do material; e interpretação e síntese dos resultados. A questão norteadora foi assim formulada: quais são as aplicações, os benefícios e os desafios dos sistemas de automação industrial no contexto da Indústria 4.0, segundo a literatura científica recente?

As buscas foram realizadas nas bases Scopus, IEEE Xplore, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library e MDPI, por concentrarem os periódicos de maior circulação nas áreas de engenharia de automação, manufatura e gestão industrial. Utilizaram-se descritores em língua inglesa, combinados por operadores booleanos, entre os quais: "industrial automation", "Industry 4.0", "cyber-physical systems", "industrial internet of things", "digital twin", "collaborative robots", "predictive maintenance", "benefits" e "challenges".

Foram adotados os seguintes critérios de inclusão: artigos revisados por pares, publicados entre 2021 e 2026, em periódicos indexados, que abordassem sistemas de automação industrial no contexto da Indústria 4.0 com foco em aplicações, benefícios ou desafios de implementação. Excluíram-se editoriais, resumos de congresso sem texto completo, publicações sem revisão por pares, textos opinativos, documentos duplicados entre bases e estudos cujo escopo não guardasse relação direta com o ambiente industrial. Após a leitura de títulos, resumos e textos completos, o corpus final reuniu dezessete estudos.

Os dados foram extraídos e organizados em matriz de síntese contendo autoria, ano, tipo de estudo, tecnologia central e principais achados, apresentada de forma consolidada no Quadro 1 da seção seguinte. A análise seguiu a técnica de categorização temática, com três eixos definidos a priori em correspondência com os objetivos específicos: sistemas e aplicações; benefícios; e desafios e perspectivas. Para reduzir o risco de viés, a seleção e a categorização foram conduzidas de forma independente pelos dois autores, com resolução de divergências por consenso. Registre-se que as obras doutrinárias de engenharia, gestão e metodologia científica empregadas na fundamentação e nesta seção não integram o corpus da revisão, restrito aos dezessete estudos publicados no recorte temporal definido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados da revisão integrativa em correspondência direta com os três objetivos específicos formulados na introdução. A exposição segue a lógica de análise definida na metodologia: os estudos selecionados foram agrupados em eixos temáticos e examinados de forma comparativa, de modo que os achados não aparecem como relatos isolados de cada pesquisa, mas como sínteses construídas a partir do confronto entre autores, com atenção tanto aos pontos de convergência quanto às divergências que permanecem em aberto na literatura.

A organização interna reflete esse desenho, onde o primeiro subtópico caracteriza o corpus analisado, apresenta a matriz de síntese que consolida autoria, tipo de estudo e foco tecnológico de cada trabalho e identifica as famílias de sistemas de automação recorrentes na produção científica recente. O segundo reúne as

evidências sobre os benefícios da adoção desses sistemas, examinados nos planos da produtividade, da eficiência operacional e da competitividade. O terceiro sistematiza os desafios de implementação e as perspectivas apontadas pelos estudos.

Ao longo da discussão, os resultados são postos em diálogo com a fundamentação teórica, o que permite verificar em que medida as evidências empíricas confirmam, matizam ou contrariam as proposições conceituais do campo.

4.1. Caracterização do Corpus e Sistemas de Automação Identificados

O corpus reuniu dezessete estudos publicados entre 2021 e 2024, dos quais nove revisões de literatura, quatro estudos empíricos com dados primários ou experimentais, dois surveys de mapeamento tecnológico e dois estudos de modelagem aplicada. O Quadro 1 sintetiza essa composição.

Quadro 1. Matriz de síntese do corpus analisado

Autoria e ano	Tipo de estudo	Tecnologia central	Eixo predominant e
Semeraro <i>et al.</i> (2021)	Revisão sistemática	Gêmeo digital	Sistemas e aplicações
Lattanzi <i>et al.</i> (2021)	Revisão	Gêmeo digital	Aplicações e desafios
Rathore <i>et al.</i> (2021)	Revisão sistemática	Gêmeo digital, IA e big data	Sistemas e aplicações
Radanliev <i>et al.</i> (2022)	Estudo teórico-	CPS, IoT e IA	Sistemas e aplicações

	conceitual		
Ghobakhloo <i>et al.</i> (2022)	Revisão sistemática	Adoção de tecnologias 4.0	Desafios
Calvo e Gil (2022)	Estudo experimental	Robô colaborativo	Benefícios
Mukherjee <i>et al.</i> (2022)	Survey	Aprendizagem robótica	Sistemas e aplicações
Jefroy, Azarian e Yu (2022)	Revisão	Transição 4.0 para 5.0	Perspectivas
Zonta <i>et al.</i> (2022)	Modelagem aplicada	Manutenção preditiva com redes neurais	Benefícios
Gadekar, Sarkar e Gadekar (2022)	Estudo empírico	Direcionadores de adoção 4.0	Benefícios e desafios
Othman e Yang (2023)	Revisão	Colaboração humano-robô	Sistemas e benefícios
Semeraro, Griffiths e Cangelosi (2023)	Revisão sistemática	Aprendizado de máquina em HRC	Sistemas e aplicações
Lampropoulos e Siakas (2023)	Revisão crítica	Gêmeo digital e cibersegurança	Desafios
Meddaoui, Hain e Hachmoud (2023)	Estudo de caso	Manutenção preditiva	Benefícios
Keshvarparast <i>et al.</i> (2024)	Revisão de literatura	Robôs colaborativos	Sistemas e desafios
Panagou, Neumann e Fruggiero (2024)	Revisão de escopo	Interação humano-robô	Desafios e perspectivas
Hector e Panjanathan (2024)	Survey	Manutenção preditiva e IIoT	Sistemas e benefícios

Fonte: elaboração própria (2026).

Em resposta ao primeiro objetivo específico, a análise do corpus permitiu identificar quatro famílias de sistemas de automação recorrentes na literatura. A primeira reúne os sistemas ciberfísicos e a Internet das Coisas Industrial, tratados como infraestrutura de base da fábrica conectada, responsável pela aquisição e pelo tráfego de dados entre o processo físico e a camada analítica (Radanliev *et al.*, 2022). A segunda corresponde aos gêmeos digitais, cuja função evoluiu da simulação para a predição e a otimização em tempo real, mediante incorporação de inteligência artificial e big data (Semeraro *et al.*, 2021; Rathore *et al.*, 2021). A terceira abrange a robótica industrial e colaborativa, aplicada a operações de montagem, manipulação e inspeção, com destaque para os arranjos em que humanos e robôs dividem o mesmo espaço de trabalho (Othman; Yang, 2023; Keshvarparast *et al.*, 2024). A quarta família compreende os sistemas de manutenção preditiva, que articulam sensoramento, supervisão e aprendizado de máquina para antecipar falhas de equipamentos (Zonta *et al.*, 2022; Hector; Panjanathan, 2024).

Cabe registrar que essas famílias não operam isoladamente. Os estudos analisados descrevem arquiteturas nas quais a IIoT alimenta o gêmeo digital, o gêmeo digital sustenta os modelos preditivos e os robôs executam as decisões resultantes, em ciclos contínuos de dados e ação. A manutenção preditiva, em particular, aparece no corpus como a aplicação que melhor materializa essa integração, pois depende simultaneamente de sensores, conectividade, modelos analíticos e integração com os sistemas de supervisão (Hector; Panjanathan, 2024).

4.2. Benefícios: Produtividade, Eficiência Operacional e Competitividade

Quanto ao segundo objetivo específico, o corpus oferece evidências convergentes de três ordens de benefícios. No plano da produtividade, Zonta *et al.* (2022) demonstram que modelos de manutenção preditiva baseados em redes neurais profundas permitem otimizar o cronograma de produção ao antecipar falhas e reprogramar ordens de serviço, o que reduz o tempo improdutivo das máquinas. Na mesma direção, Calvo e Gil (2022) comprovam experimentalmente que a integração de robôs colaborativos em células de montagem gera economia mensurável de tempo de processo, com efeito direto sobre o volume produzido por turno. Othman e Yang (2023) agregam a essa discussão os ganhos de flexibilidade, ao mostrarem que arranjos colaborativos entre humanos e robôs combinam a precisão e a repetibilidade da máquina com a capacidade humana de adaptação a variações de produto.

No plano da eficiência operacional, o benefício mais documentado é a redução de paradas não planejadas. Hector e Panjanathan (2024) sistematizam a literatura sobre manutenção preditiva habilitada por IIoT e concluem que a detecção antecipada de anomalias em dados de sensores desloca a manutenção de uma lógica reativa para uma lógica proativa, com efeitos sobre custo, disponibilidade de ativos e consumo de recursos. O estudo de caso de Meddaoui, Hain e Hachmoud (2023) confirma esse achado em ambiente industrial real, ao estabelecer métodos confiáveis de predição de falhas e evidenciar sua contribuição para a excelência da manufatura. Esses resultados dialogam com Lattanzi *et al.* (2021), para quem o valor do

gêmeo digital na operação depende justamente da qualidade dos dados que alimentam os modelos preditivos.

No plano da competitividade, Gadekar, Sarkar e Gadekar (2022) verificam empiricamente, em indústrias de manufatura, relação positiva entre os direcionadores da Indústria 4.0, a adoção efetiva das tecnologias e o desempenho organizacional sustentável, o que reforça o argumento de Ghobakhloo *et al.* (2022) de que a transformação digital constitui opção estratégica para a permanência das empresas em cadeias de valor cada vez mais digitalizadas. O confronto entre esses autores revela, contudo, uma assimetria relevante: os ganhos competitivos concentram-se nas organizações que dispõem de recursos para investimentos continuados, enquanto as demais tendem a capturar benefícios parciais, restritos a aplicações pontuais.

4.3. Desafios e Perspectivas de Implementação

Em resposta ao terceiro objetivo específico, os desafios identificados no corpus distribuem-se em quatro categorias. A primeira é de natureza econômica. O custo de aquisição, integração e manutenção das tecnologias aparece como barreira transversal, com peso maior para as pequenas e médias empresas, que enfrentam restrições de capital e dificuldade de estimar o retorno do investimento (Ghobakhloo *et al.*, 2022). Keshvarparast *et al.* (2024) observam que mesmo os robôs colaborativos, concebidos como alternativa de menor custo à robótica convencional, exigem investimentos complementares em reorganização de leiaute, segurança e programação que oneram a implantação.

A segunda categoria é técnica e concentra-se na integração com sistemas legados e na interoperabilidade. Ghobakhloo *et al.* (2022) demonstram que a incompatibilidade entre as tecnologias da Indústria 4.0 e a infraestrutura instalada figura entre os determinantes que mais afastam as empresas da decisão de adoção. Lattanzi *et al.* (2021) chegam a conclusão análoga no campo dos gêmeos digitais, ao apontarem que a construção de modelos fiéis depende de dados consistentes provenientes de equipamentos heterogêneos, nem sempre preparados para comunicação digital. Semeraro *et al.* (2021) acrescentam que a ausência de padronização conceitual e de arquiteturas de referência dificulta a replicação das soluções entre plantas e setores.

A terceira categoria envolve a cibersegurança. A conexão de ativos industriais a redes externas amplia a superfície de ataque das plantas e introduz riscos que a automação clássica, isolada por projeto, não conhecia. Lampropoulos e Siakas (2023) examinam criticamente essa vulnerabilidade e indicam o gêmeo digital como instrumento de mitigação, por permitir simular ataques e validar defesas sem expor o processo real, ao mesmo tempo em que reconhecem que a própria réplica digital se torna um alvo adicional a proteger. O tema reaparece em Ghobakhloo *et al.* (2022) como fator de hesitação das empresas de menor porte, que raramente dispõem de equipes especializadas em segurança de tecnologia de operação.

A quarta categoria é organizacional e humana. A escassez de competências digitais limita tanto a implantação quanto a operação dos sistemas de automação (Ghobakhloo *et al.*, 2022). Panagou, Neumann e Fruggiero (2024) ampliam essa discussão ao evidenciarem que a literatura sobre interação humano-robô ainda

trata de forma insuficiente os fatores humanos, como confiança, carga cognitiva e bem-estar, cuja negligência compromete a aceitação das tecnologias pelos trabalhadores. Mukherjee *et al.* (2022) reforçam que a colaboração segura e produtiva entre humanos e robôs em ambientes dinâmicos permanece um problema de pesquisa em aberto, dependente de avanços em aprendizagem robótica.

Quanto às perspectivas, dois movimentos se destacam no corpus. O primeiro é a incorporação progressiva de inteligência artificial aos sistemas de automação, que desloca o valor da tecnologia do controle para a predição e a otimização (Rathore *et al.*, 2021; Hector; Panjanathan, 2024). O segundo é a transição conceitual em direção à Indústria 5.0, que recoloca o ser humano no centro do projeto dos sistemas produtivos e associa a automação às agendas de resiliência e sustentabilidade (Jefroy; Azarian; Yu, 2022; Panagou; Neumann; Fruggiero, 2024). O cruzamento dessas duas tendências sugere que a próxima geração de sistemas de automação será avaliada menos pela capacidade de substituir o trabalho humano e mais pela qualidade da colaboração que estabelece com ele.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados confirmam a hipótese formulada, os sistemas de automação industrial desempenham papel relevante na implementação da Indústria 4.0 e geram ganhos documentados de produtividade, eficiência operacional e competitividade, ao passo que sua adoção permanece condicionada por barreiras econômicas, técnicas, de segurança e organizacionais.

Os três objetivos específicos foram atingidos, onde a revisão conseguiu demonstrar quatro famílias de sistemas que estruturam a automação contemporânea: sistemas ciberfísicos com Internet das Coisas Industrial, gêmeos digitais, robótica colaborativa e plataformas de manutenção preditiva. A análise evidencia que os benefícios se manifestam na redução de paradas não planejadas, na otimização da programação da produção, na economia de tempos de processo e no fortalecimento do desempenho organizacional. O exame dos desafios mostra que custo de investimento, integração com sistemas legados, cibersegurança e escassez de competências digitais explicam a distância entre o potencial descrito pela literatura e a realidade da maioria das empresas, com desvantagem acentuada para as de menor porte.

A principal contribuição do estudo reside na síntese integrada dessas duas vertentes, aplicações e limitações, usualmente tratadas em separado pela literatura. Desse cruzamento emerge um achado central: os sistemas de automação da Indústria 4.0 operam como conjunto interdependente, e não como tecnologias isoladas, de modo que estratégias de adoção fragmentadas tendem a capturar apenas parcela dos benefícios possíveis.

Torna-se imperativo registrar que a revisão apresenta limitações, pois o recorte temporal de cinco anos exclui contribuições anteriores relevantes. A predominância de publicações em língua inglesa pode subrepresentar experiências de países em desenvolvimento. O corpus, embora criterioso, é enxuto, e a heterogeneidade metodológica dos estudos impede comparações quantitativas diretas entre os resultados reportados.

Pesquisas futuras podem avançar em três direções: estudos empíricos sobre a adoção de sistemas de automação em pequenas e médias empresas de economias em desenvolvimento, inclusive no contexto brasileiro; construção de métricas padronizadas de retorno sobre o investimento em tecnologias 4.0, capazes de orientar decisões gerenciais; e investigações sobre os fatores humanos da colaboração com sistemas autônomos, na perspectiva aberta pela Indústria 5.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. de A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**, Belo Horizonte, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.

CALVO, R.; GIL, P. Evaluation of collaborative robot sustainable integration in manufacturing assembly by using process time savings. **Materials**, v. 15, n. 2, 611, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma15020611>. Acesso em: 9 jul. 2026.

GADEKAR, R.; SARKAR, B.; GADEKAR, A. Investigating the relationship among Industry 4.0 drivers, adoption, risks reduction, and sustainable organizational performance in manufacturing industries: an empirical study. **Sustainable Production and Consumption**, v. 31, p. 670-692, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.03.010>. Acesso em: 9 jul. 2026.

GHOBAKHLOO, M.; IRANMANESH, M.; VILKAS, M.; GRYBAUSKAS, A.; AMRAN, A. Drivers and barriers of Industry 4.0 technology adoption among manufacturing SMEs: a systematic review and transformation roadmap. **Journal of Manufacturing Technology**

Management, v. 33, n. 6, p. 1029-1058, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/JMTM-12-2021-0505>. Acesso em: 9 jul. 2026.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GROOVER, Mikell P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HECTOR, I.; PANJANATHAN, R. Predictive maintenance in Industry 4.0: a survey of planning models and machine learning techniques. **PeerJ Computer Science**, e2016, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.2016>. Acesso em: 9 jul. 2026.

JEFROY, N.; AZARIAN, M.; YU, H. Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: what are the implications for smart logistics? **Logistics**, v. 6, n. 2, 26, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/logistics6020026>. Acesso em: 9 jul. 2026.

KESHVARPARAST, A.; BATTINI, D.; BATTIA, O.; PIRAYESH, A. Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 35, n. 5, p. 2065-2118, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w>. Acesso em: 9 jul. 2026.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

LAMB, Frank. **Automação industrial na prática**. Porto Alegre: AMGH, 2015. (Série Tekne).

LAMPROPOULOS, G.; SIAKAS, K. Enhancing and securing cyber-physical systems and Industry 4.0 through digital twins: a critical review. **Journal of Software: Evolution and Process**, v. 35, n. 7, e2494, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/smr.2494>. Acesso em: 9 jul. 2026.

LATTANZI, L.; RAFFAELI, R.; PERUZZINI, M.; PELLICCIARI, M. Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 34, n. 6, p. 567-597, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1911003>. Acesso em: 9 jul. 2026.

MEDDAOUI, A.; HAIN, M.; HACHMOUD, A. The benefits of predictive maintenance in manufacturing excellence: a case study to establish reliable methods for predicting failures. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 128, n. 7-8, p. 3685-3690, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-12086-6>. Acesso em: 9 jul. 2026.

MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. **Engenharia de automação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MUKHERJEE, D.; GUPTA, K.; CHANG, L. H.; NAJJARAN, H. A survey of robot learning strategies for human-robot collaboration in industrial settings. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 73, 102231, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102231>. Acesso em: 9 jul. 2026.

OTHMAN, U.; YANG, E. Human-robot collaborations in smart manufacturing environments: review and outlook. **Sensors**, v. 23, n.

12, 5663, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23125663>. Acesso em: 9 jul. 2026.

PANAGOU, S.; NEUMANN, W. P.; FRUGGIERO, F. A scoping review of human robot interaction research towards Industry 5.0 human-centric workplaces. **International Journal of Production Research**, v. 62, n. 3, p. 974-990, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2172473>. Acesso em: 9 jul. 2026.

RADANLIEV, P.; DE ROURE, D.; NICOLESCU, R.; HUTH, M.; SANTOS, O. Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0. **International Journal of Intelligent Robotics and Applications**, v. 6, n. 1, p. 171-185, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41315-021-00180-5>. Acesso em: 9 jul. 2026.

RATHORE, M. M.; SHAH, S. A.; SHUKLA, D.; BENTAFAT, E.; BAKIRAS, S. The role of AI, machine learning, and big data in digital twinning: a systematic literature review, challenges, and opportunities. **IEEE Access**, v. 9, p. 32030-32052, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3060863>. Acesso em: 9 jul. 2026.

SACOMANO, José Benedito; GONÇALVES, Rodrigo Franco; BONILLA, Sílvia Helena (org.). **Indústria 4.0: conceitos e fundamentos**. São Paulo: Blucher, 2018.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. Tradução de Daniel Moreira Miranda. São Paulo: Edipro, 2016.

SEMERARO, C.; LEZOCHÉ, M.; PANETTO, H.; DASSISTI, M. Digital twin paradigm: a systematic literature review. **Computers in Industry**, v. 130, 103469, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103469>. Acesso em: 9 jul. 2026.

SEMERARO, F.; GRIFFITHS, A.; CANGELOSI, A. Human-robot collaboration and machine learning: a systematic review of recent research. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 79, 102432, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102432>. Acesso em: 9 jul. 2026.

SEVERINO, Antonio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. 22. ed. São Paulo: Cortez, 2002.

SHINGO, Shigeo. **O sistema Toyota de produção: do ponto de vista da engenharia de produção**. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2018.

SOUZA, M. T. de; SILVA, M. D. da; CARVALHO, R. de. Revisão integrativa: o que é e como fazer. **Einstein (São Paulo)**, v. 8, n. 1, p. 102-106, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-45082010RW1134>. Acesso em: 9 jul. 2026.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

ZONTA, T.; DA COSTA, C. A.; ZEISER, F. A.; RAMOS, G. de O.; KUNST, R.; RIGHI, R. da R. A predictive maintenance model for optimizing production schedule using deep neural networks. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 62, p. 450-462, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.12.013>. Acesso em: 9 jul. 2026.

¹ Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente pela Universidade Federal de Sergipe (UFS). Mestre em Sociedade, Tecnologias e Políticas Públicas. Docente do colegiado de Direito do Centro Universitário AGES. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Mestranda em Engenharia Industrial (Universidad Europea - Barcelona, Espanha). Especialista em Gestão de Projetos e Engenheira de Suporte na Infotec a serviços da Petrobras (Edisen/RJ). Engenheira de Software - E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail.](#)